



TITLE:

## 研究室紹介

AUTHOR(S):

---

CITATION:

研究室紹介. Cue 2001, 8: 18-35

ISSUE DATE:

2001-12

URL:

<https://doi.org/10.14989/57829>

RIGHT:

## 研究室紹介

このページでは、電気系関係研究室の研究内容を少しずつシリーズで紹介して行きます。今回は下記のうち太字の研究室が、それぞれ1つのテーマを選んで、その概要を語ります。

(※は「新設研究室紹介」、☆は「大学の研究・動向」のページに掲載)

## 電気系関係研究室一覧

### 工学研究科

#### 電気工学専攻

複合システム論講座 (荒木研)

**電磁工学講座** 電磁エネルギー工学分野 (島崎研)

電磁工学講座 超伝導工学分野 (牟田研)

電力工学講座 電力発生伝送工学分野 (宅間研)

電力工学講座 電力変換制御工学分野 (引原研) ※

電気システム論講座 電気回路網学分野 (奥村研)

電気システム論講座 自動制御工学分野 (萩原研)

電気システム論講座 電力システム分野

#### 電子物性工学専攻

集積機能工学講座 (鈴木研)

電子物理学講座 極微真空電子工学分野 (石川研) ☆

電子物理学講座 プラズマ物性工学分野 (橘研)

機能物性工学講座 半導体物性工学分野 (松波研)

機能物性工学講座 電子材料物性工学分野 (松重研)

量子工学講座 光材料物性工学分野 (藤田研)

量子工学講座 光量子電子工学分野 (野田研)

量子工学講座 量子電磁工学分野 (北野研)

#### イオン工学実験施設

高機能材料工学講座 クラスタイオン工学分野

### 情報学研究科

#### 知能情報学専攻

知能メディア講座 言語メディア分野

知能メディア講座 画像メディア分野 (松山研) ☆

#### 通信情報システム専攻

通信システム工学講座 デジタル通信分野 (吉田研)

通信システム工学講座 伝送メディア分野 (森広研)

通信システム工学講座 知的通信網分野 (高橋研)

集積システム工学講座 大規模集積回路分野 (小野寺研)

集積システム工学講座 情報回路方式論分野 (中村研)

集積システム工学講座 超高速信号処理分野 (佐藤研)

#### システム科学専攻

システム情報論講座 画像情報システム分野 (英保研)

システム情報論講座 医用工学分野 (松田研)

### エネルギー科学研究科

#### エネルギー社会・環境科学専攻

エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野 (吉川栄研)

#### エネルギー基礎科学専攻

エネルギー物理学講座 電磁エネルギー学分野 (近藤研)

#### エネルギー応用科学専攻

応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野 (塩津研)

応用熱科学講座 エネルギー応用基礎学分野 (野澤研)

### エネルギー理工学研究所

エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野 (井上研)

エネルギー生成研究部門 粒子エネルギー研究分野 (吉川潔研)

エネルギー生成研究部門 プラズマエネルギー研究分野 (大引研)

エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研)

### 宙空電波科学研究センター

#### 地球電波科学研究部門

大気圏光電波計測分野 (津田研)

#### 宇宙電波科学研究部門

宇宙電波工学分野 (松本研)

電波科学シミュレーション分野 (大村研)

#### 電波応用工学研究部門

マイクロ波エネルギー伝送分野 (橋本研)

レーダーリモートセンシング工学分野 (深尾研)

### 京都大学ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー (KU-VBL)

### 国際融合創造センター

先進電子材料分野 (藤田静研) §

ベンチャー分野 § §

注 § 工学研究科電子物性工学専攻藤田茂研と一体運営

§ § 工学研究科電子物性工学専攻橘研と一体運営

## 電磁工学講座 電磁エネルギー工学分野（島崎研究室） 「代数的マルチグリッド法による高速電磁界解析」

近年、CADシステムの普及などにより、実用的な電気機器の設計段階において数値解析によるアプローチが重要となっていますが、電磁界問題を対象とした数値解析の多くは有限要素解析をベースにしており、最終的には大規模な連立一次方程式を解くことに帰着します。島崎研究室では、これらの有限要素解析に有用な高速ソルバの開発を研究テーマの一つとし、CG法やGMRES法、BICGSTAB法などの代表的なソルバと、その並列分散処理について研究を行ってきました。CUE1999年12月号においては、並列処理が困難であることが知られている不完全コレスキー分解を前処理としたCG法(ICCG法)について、ソルバ内で自動的に係数行列のオーダリングを変更する手法によって良好な並列化効率を得た成果について紹介しています。これらのソルバは高い汎用性と簡便性を大きな長所としていますが、最近ではより高速な解法としてマルチグリッド法が注目されています。

### ①代数的マルチグリッド法の導入による解析の高速化

有限要素解析で現れる連立一次方程式にクリロフ部分空間法を適用して求解する場合、問題のサイズが大きくなるにしたがって、近似解が十分な精度に収束するまでに必要な反復回数が増加し、計算時間が急激に増大することが知られています。これに対してマルチグリッド法は、必要な反復回数が理想的には問題サイズによらず一定であり、大規模問題に対する優位性から注目を集めています。しかしながら、マルチグリッドソルバにおいてはコーディングに問題依存の部分が多く、汎用ソルバの開発が困難です。そこで、島崎研究室では、ソルバの汎用性を最大限保ちつつ高速化を行う目的で、代数的マルチグリッド法の導入を検討しています。

代数的マルチグリッド法は、マルチグリッド法のコンセプトによって非常に速い収束を得る一方で、係数行列と右辺ベクトル以外の情報を使用しないという特徴を持ちます。このためICCG法などと同様にブラックボックス的に扱うことが可能で、当研究室の指向する汎用ソルバの開発に適しています。図1は、2次元静磁界解析について代数的マルチグリッド(AMG)法とICCG法による計算時間を比較したものです。問題の規模が大きくなるほど代数的マルチグリッド法の優位性が高いことが分かります。

### ②並列分散処理

最近の電磁解析分野では、3次元問題、非線形問題、過渡現象問題などの計算量の多い問題を扱う場合が多くなってきており、計算機にもその大容量性、高速性が求められています。これらの要請に対する解決策の一つとして並列コンピューティングが挙げられます。島崎研究室では、有限要素解析に対する高速ソルバの開発において、並列計算機を用いた高速化を主幹として研究を展開してきました。代数的マルチグリッド法を用いたソルバについても、その並列版を開発し、渦電流解析のサンプル問題について高い速度向上を得ています。(図2)

### ③今後の展開

今後は、マルチカラーオーダリングによるICCG法の並列化、辺要素有限要素解析における代数的マルチグリッド法の適用などについて検討を行っていく予定です。

文献 [1] T. Mifune, T. Iwashita, M. Shimasaki, "A Fast Solver for FEM Analyses Using the Parallelized Algebraic Multigrid Method," IEEE Transactions on Magnetics, 2001 (掲載予定)

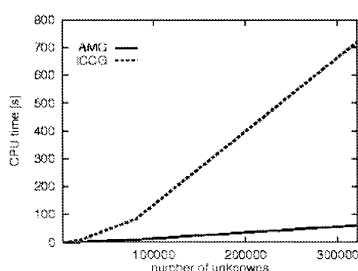


図1 計算時間の比較

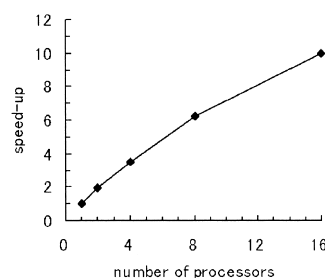


図2 並列化による速度向上

## 電力工学分野 電力発生伝送工学分野（宅間研究室） 「混合ガス絶縁と混合ガスの分離回収法の開発研究」

現在の電力分野におけるガス絶縁方式には絶縁能力の優れたSF<sub>6</sub>ガス（六フッ化硫黄ガス）が専ら使われています。しかし、このガスは地球温暖化効果（GWP：Global Warming Potential）がCO<sub>2</sub>に比べて約24,000倍と非常に大きいため、1997年に京都で開催されたCOP3ではCO<sub>2</sub>や他のフロンガスなどとともに削減対象ガスに指定されました。CO<sub>2</sub>の排出量に比べるとSF<sub>6</sub>のそれは絶対量が少ないため、温暖化への寄与は全体の1%にも満たないと見積もられていますが、ヨーロッパでは使用を禁止する国や購入するときに高額税を課す国が出ています。

SF<sub>6</sub>の使用量を削減するために現在各国で研究されているのがN<sub>2</sub>などの通常ガスにSF<sub>6</sub>を少量加えた混合ガスを用いる絶縁方式です。これは、SF<sub>6</sub>の分量が体積比で10%ないし20%と少なくとも絶縁性能がそれほど低下しないという非線形効果（相乗効果）を利用するものです。絶縁性能が低下した分はガス圧の増大によって補うことになりますが、SF<sub>6</sub>の量は5分の1程度に下げることができます。

混合ガス絶縁を実用化する際の最大の問題は混合ガスの分離回収装置がないことでした。すなわち、機器の保守や廃棄のときにSF<sub>6</sub>だけを分離して回収する必要がありますが、液化温度が低い（約-60℃）ために従来の液化法では大気への排出量が数十%にも達し、これでは混合ガス絶縁に切り替える意味がなくなってしまうからです。当研究室ではCOP3の直後から混合ガス絶縁の研究と同時に分離回収法の開発研究に着手しました。前者については別の機会に報告します。

われわれが用いたガス分離法は高分子膜を用いるもので、SF<sub>6</sub>の膜透過速度がN<sub>2</sub>よりも二けたほど小さいことを利用します。1段の膜だけでは漏れ出るSF<sub>6</sub>が幾分か大きいため、図1のように、2段の膜（M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>）で分離するように工夫しました。それぞれの段に供給するガスの圧力（P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>）をパラメータとし、また回収側のガス流量（I<sub>b</sub>）を変えて実験を繰り返しました。図2のように、この方法で分離回収したSF<sub>6</sub>の濃度は99%と高く、漏れ出るSF<sub>6</sub>の量、すなわち回収損失は1%程度と小さくすることができました。この装置はモレキュラーシーブ（分子ふるい）を用いるPSA（Pressure Swing Adsorption）法など他の方法の追随を許さない高純度で低損失のガス回収装置であり、ガス処理速度も十分に大きく実用に耐えるものです。混合ガス絶縁技術とガス分離回収技術とによって、近い将来混合ガス絶縁を用いた電力機器が実現するものと期待しています。

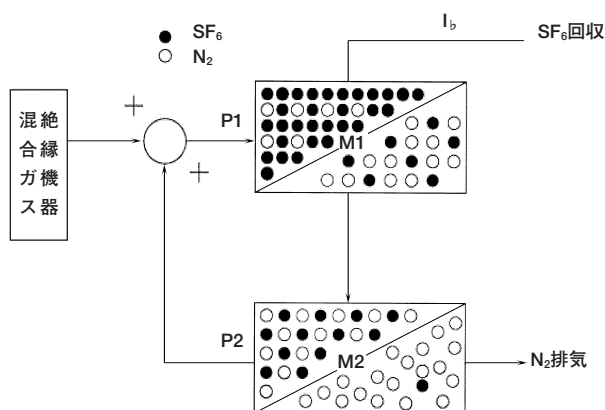


図1 ガス分離の概念

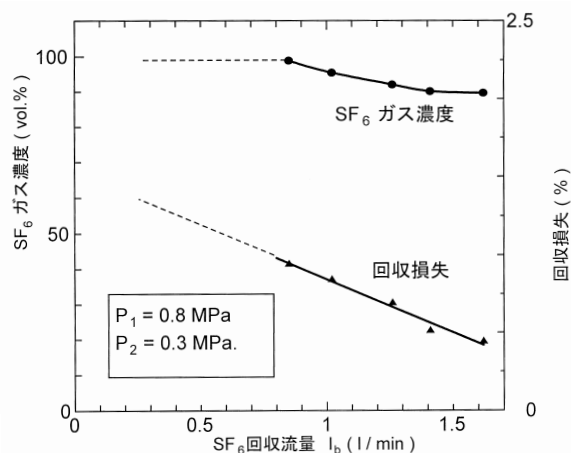


図2 実験結果

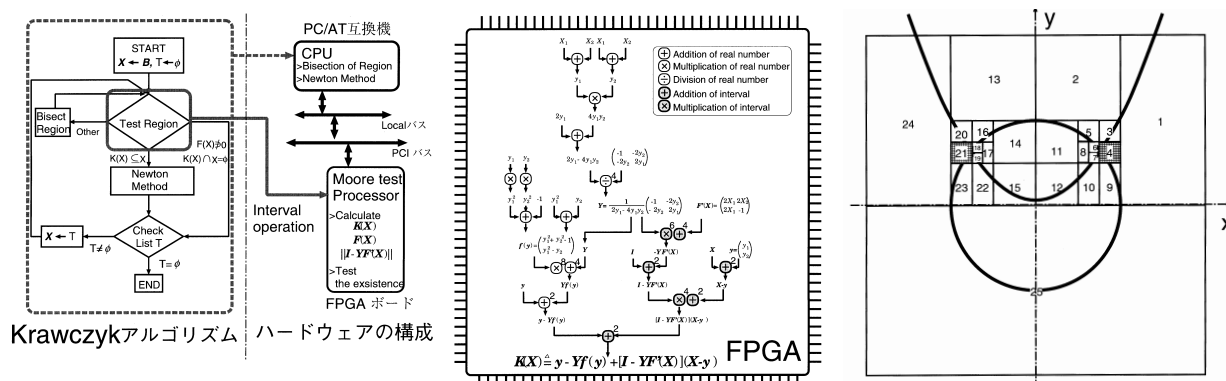
## 電気システム論講座 電気回路網学分野（奥村研究室） 「アルゴリズムのハードウェア化」

### 1. はじめに

FPGA (Field Programmable Gate Array) は再構成可能 (Reconfigurable) な集積回路で、チップ上に瞬時に論理回路を構成できます。このチップを用いることにより、これまでソフトウェアとしてCPUに計算させていた様々なアルゴリズムを回路として実現し、高速に実行することが可能になります。当研究室では、このチップをAT互換機のPCIバス上に実装することによって、アルゴリズムをリアルタイムシステムとして実現する方法を提案しています。

### 2. 方程式のすべての解を求めるシステム

連立非線型方程式のすべての解を求める方法として、区間演算を用いたKrawczykのアルゴリズムが知られています。しかしこの方法は膨大な数の区間演算を必要とするため、大規模な問題に直接適用することは難しいとされてきました。そこで当研究室では大規模並列アルゴリズムを提案してきましたが、さらにFPGAを用いてこのアルゴリズムのハードウェア化を行いました。下図は円と放物線の交点を求めるチップの試作例を示しています。区間演算を用いて解の存否を判定する部分 (Moore test) を専用ハードウェアとして実現することにより、高速な全解探索システムが実現できます。



#### 1) アルゴリズムのハードウェア化

アルゴリズムをハードウェアとしてFPGAで実行させる部分とソフトウェアとしてCPUで実行させる部分に分けます。

#### 2) 方程式をチップ上に実現

FPGAの再構成可能性を利用すると、方程式までも回路として実現できます。この図はKrawczyk関数の実現例です。

#### 3) 全解探索の結果

区間演算を用いたMoore testを行うと、円と放物線の交点を含む領域が抽出されます (番号は探索の順序)。

### 3. 故障点検出システム

電力ネットワークにおける故障の検出および故障点の標定には、現在30～50ミリ秒を必要としています。当研究室ではウェーブレット変換と自己相関関数を用いることにより、故障点の検出および標定が1ミリ秒以下でできる方法を提案しました。そこで、このアルゴリズムを実際にハードウェア化し、電力ネットワークの故障点を検出するシステムを作成しました [1]。作成したシステムは、1個のウェーブレット変換プロセッサと2個の自己相関プロセッサを用い、AT互換機のPCIバス上に実装することにより、UNIXを用いて制御可能なシステムを構築しています。

#### <参考文献>

[1] 久門 尚史, 田中 宏司, 奥村浩士: "ウェーブレット変換による伝送線路の故障点標定システム," 電気学会論文誌B, Vol. 121-B, No.9, pp.1139-1148, 2001.



## 集積機能工学講座（鈴木研究室）

## 「機能集積ナノ構造を利用した短パルス固有トンネル分光」

約1ナノメートル程度の薄い絶縁層(障壁層)を電子が透過するトンネル効果は,ジョセフソン効果など多彩な量子現象の起こる,物理と電子デバイスの重要な舞台である。この現象が発現するためには,電子がトンネルする絶縁層あるいは障壁層が平坦で均一であることが重要である。これまでジョセフソン接合などトンネル接合が作られてきたが,良質な特性を示す接合は金属の表面をその物質の酸化物で被膜する方法により作製されたものであった。異なる物質の絶縁膜を堆積してトンネル接合を形成する方法はほとんど成功しない。このように,異なる電子機能を有する異種物質のナノスケールにおける機能集積化が,非常に魅力的であるにもかかわらず,極めて困難である。

一方,層状結晶構造を有する高温超伝導体あるいはマンガン酸化物強磁性体の中には,トンネル接合が結晶の中に天然に形成されている物質がある。こうした接合の障壁層は原子レベルで平坦であり,理想的なトンネル特性が観察され,固有トンネル接合と呼ばれている。また,そうした固有トンネル接合がジョセフソン接合などになっている物質は,量子機能が集積されていることなどから機能集積型複合酸化物と呼ばれる。当講座では,先端技術を駆使して機能集積型複合酸化物の電子機能を抽出し,そのデバイス化のための基盤技術を開発し,新しいデバイス機能の創成を目的としている。

図1は微細加工技術を用いてビスマス系高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ の単結晶から切り出した微小メサ構造(10 $\mu\text{m}$ 角,15nm厚)の電流電圧特性である。ステップ状の電圧分枝の数が8本見られ,このことから微小メサ構造には8個の固有ジョセフソン接合が含まれていることが確認できる。こうして得られた接合は理想的なトンネル特性と考えられ,基礎的な物性研究からエレクトロニクス応用まで幅広く利用可能である。その一つの例として,当研究室ではこうした微小メサ構造を利用した短パルストンネル分光法を開発した。この方法は物質の表面状態に影響されないという他の分光法にない優れた特長を有している。図2は最近の実験結果である。分光時におけるパルス形状を改良して電界降伏を抑制し,広い電圧範囲でのデータ取得が可能となり,転移温度 $T_c$ (図の点線で示す特性)においてもギャップ構造を示す擬ギャップが十分観察可能となった。この実験結果から高温超伝導体における擬ギャップの構造および超伝導ギャップとの関係など重要な知見を得ている。

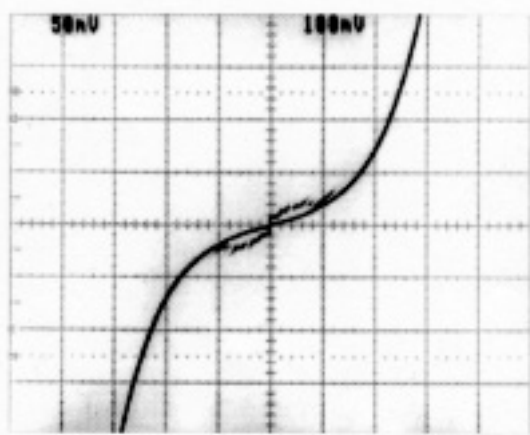


図1： $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 微小メサ構造の電流電圧特性。X軸:100mV/div,Y軸:0.5mA/div。

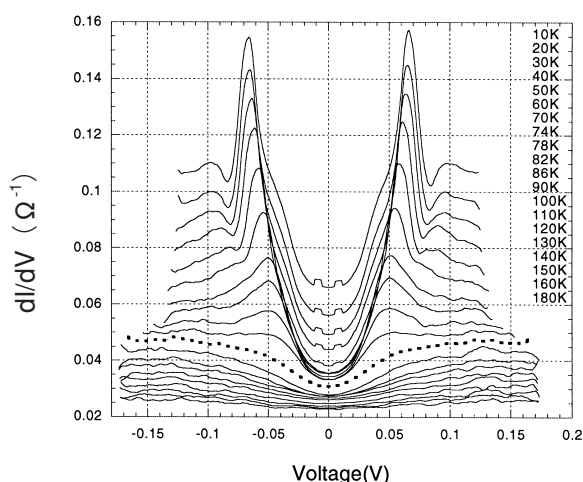


図2： $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ 微小メサ構造のトンネル分光( $dI/dV$ )特性。

## 機能物性工学講座 半導体物性工学分野（松波研究室） 「次世代パワー半導体デバイス実現を目指すシリコンカーバイドの研究」

ワイドギャップ半導体シリコンカーバイド（SiC）は、シリコン（Si）に比べて、絶縁破壊電界強度が約10倍、飽和電子速度が約2倍、禁制帯幅と熱伝導率が約3倍という優れた物性値を持つ。これをパワーデバイスに適用すれば、デバイスが小型化され、動作時のジュール損失をSiより2桁程度下げられる。また、高速動作によってスイッチング時の損失を極端に少なくできる。さらに、高温動作ができるので、冷却装置の大幅な小型化、簡素化（水冷→空冷など）ができる。この技術が実用できればパワーエレクトロニクスの枠組みを大きく変えて電気エネルギーの有効利用が図れ、ひいては環境への負荷を小さくすることができる。しかしながら、SiCパワーデバイスの実現には、高品質の結晶成長技術、デバイスプロセス技術の確立の面で大きな課題が立ちだかっていた。

研究室では、SiCパワーデバイスの実現を目指して、高品質の結晶成長技術、デバイスプロセス技術を確認し、基本デバイスを試作して、その高性能を提示することに力を注いできた。1) 「ステップ制御エピタキシー法」を提案し（1987）、それまでは不可能であった高品質SiC単結晶層を、気相化学堆積（CVD）法を用いて300℃以上も低い温度で作製できるようにした。基本概念は、SiC結晶（0001）面から数度傾けたオフ基板を用い、ステップフロー成長を活用して、基板が持つ複雑な積層構造を容易に継承させることにある。現在、不純物を添加しない結晶でppb（ $10^{-9}$ ）の超高純度を達成し、成長中の不純物添加によってp型、n型の精密な導電性制御法を確立している。物性面から本方法のすぐれた点を示したほか、結晶成長機構の詳細な研究を行い、学術的にその理由付けを行った。2) パワーデバイス製作の重要技術として高温イオン注入法による局所的な不純物添加法を提案し、注入後のアニール条件を確立して、SiCへの実用技術としての道を開くきっかけを作った。n型、p型とも実用の域にあるが、p型についてはさらに改善の余地がある。3) 高品質エピタキシャル成長層を用い、耐圧1kV以上で低損失のショットキーダイオードを試作し、実用の可能性を示した（1993, 1995）。物性面では、SiC結晶の極性面（Si面、C面）の違いによってショットキー障壁高さが異なることを見だし、その物理的根拠を明らかにした。この成果は、世界的な規模で半導体SiCの応用展開を目指した研究に拍車をかけた。現在、Siでは実現できない中耐圧（300V, 600V）・低損失の高速ショットキーダイオードが市販されるようになっている。4) スwitchングトランジスタは動作時以外に電流の流れないノーマリオフ型が望ましく、それにはパワーMOSFET（金属・酸化膜・半導体電界効果トランジスタ）が適している。しかしながら、 $\text{SiO}_2/\text{SiC}$ のMOS界面に存在する多数の欠陥があり、反転層の電子移動度が極端に小さくなって、MOSFETの特性が悪い。このため、SiCパワーMOSトランジスタの実現は、当面、困難であろうとの認識が固まりつつあった。1999年、従来の（0001）とは異なるSiCの新しい結晶面方位（11 $\bar{2}$ 0）を用いることによって、長年の課題であったMOSFETの性能を約20倍向上させ、SiCを用いるパワーMOSFET実現化への可能性を示した。電子移動度が負の温度依存性を持つので、温度上昇に連れて電流が減少することを意味し、パワーデバイスとしては安定動作が期待できる。現在、SiCショットキーダイオードを用いる低雑音スイッチング電源が使われる状況にある。今後は、家電、自動車、産業用モータ制御用インバータとして、システム面での実施例研究へと発展するであろう。直径3インチの基板結晶が市販され、結晶欠陥も低減しつつあるので、高耐圧・大電流のパワーデバイスが比較的近い将来に実現できよう。研究室では、それに向けての研究を鋭意展開している。なお、このSiCの研究に対して、文部科学省の科学研究費特別推進研究（1997～2000）を受け、項目1）、2）、4）の研究項目で大きな成果を得た。関連して、産業界を中心として、産業経済省が「超低損失電力素子」の国プロジェクトを展開させている。この材料に関連する国際会議（つくば、2000）に国内外から500人を越える参加者があり（海外から約240人）、基礎と応用の繋がりがたいへん強くなっている。

## 量子工学講座 光材料物性工学分野（藤田研究室）

## 「ZnO系薄膜の高品質化と物性制御およびその応用に関する研究」

ZnO系材料は、従来、粉末結晶体、多結晶薄膜、焼結体といった形で透明性導電膜、表面弾性波デバイス、トランスデューサ、触媒膜、蛍光体、バリスタ材料など、多様な用途に利用されてきた。一方、この材料は、3.4eVという広い禁制帯幅をもつワイドギャップ材料で、しかも励起子結合エネルギーが60meVという大きな値を有するため、可視から紫外にわたる広い波長領域で動作する「励起子光機能デバイス」材料としても高いポテンシャルを有する。さらに、このような特徴ある光機能と従来の多様な機能との集積・融合を図ることで、新しい多機能・高機能デバイスの創出に結びつく可能性が高い。しかしながら、このような新機能デバイスを実現させるためには、高純度・高品質単結晶薄膜の成長技術の確立と半導体デバイス材料として位置づけ得るように電気的・光学的物性制御が必須である。近年、エピタキシャル成長技術の進展によりZnO系においても高品質化と光機能デバイス実現に向けた研究が世界的に活発化している。本研究では、目標とするデバイスに必要な機能を最大限に引き出すという戦略から様々な薄膜成長法を試み、高品質化成長条件の最適化を図るとともに、現技術レベルでは困難とされている物性制御に挑戦しそれを達成する技術を開発することを目的に研究している。ここでは、その基礎的な研究の一端として、大面積基板適応性、量産性、選択成長性、制御性等に優れた有機金属気相成長法（Metalorganic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE）を用いたZnOの結晶成長とその光学的特性に関する研究の概要を紹介する。

ジエチル亜鉛（diethylzinc：DEZ）、 $N_2O$ を原料としたMOVPEにより、ZnOバルク単結晶を基板としたホモエピタキシャル成長を行っている。基板の成長直前の熱処理による高温清浄化により成長層の核成長制御を行い、X線ロックアップカーブ半値幅200sec、9Kにおけるホトルミネセンス半値幅3meV（図1）と、表面平坦性が良好で（図2）結晶性に優れたZnO単結晶薄膜を得ることができ、高品質化が達成されつつある。さらに、ZnO系発光デバイスとSi集積回路との融合を目的として、Si基板上への成長に関する検討も行っている。基板表面での核成長制御が課題ではあるが、バンド端での紫外発光が支配的なZnO薄膜を成長可能となった。緩衝層の最適化で高品質化への見通しが得られるものと期待している。また、デバイス化への基本的要請であるp型層の実現に向け、窒素の添加実験も行っている。アクセプタ準位の形成は確認しているがp型層の特性評価を定量的に行う必要がある。結果を成長条件に反映させることによりp型化に向けた電気的特性の制御が可能になるものと期待される。

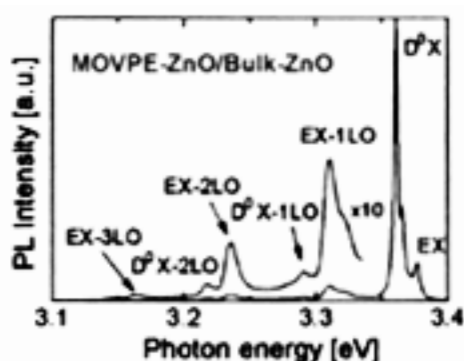


図1：バルクZnO上にMOVPE成長したZnOのホトルミネセンススペクトル。狭い半値幅を持った励起子発光 ( $D^0X$ ) が観察される。

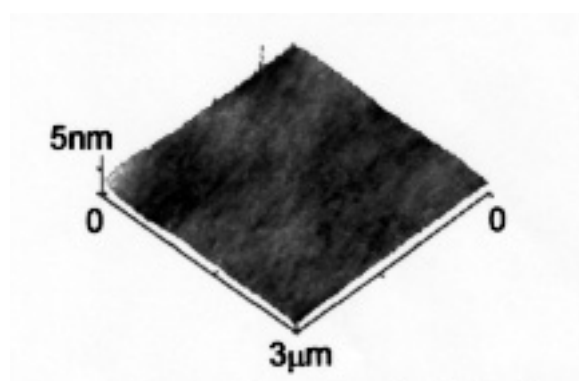


図2：バルクZnO上のZnOの表面。きわめて平坦な表面が形成されている。



## 高機能材料工学講座（イオン工学実験施設） 「多原子イオンビーム照射による表面反応過程」

多原子から成る分子イオン（例えば、フラーレンなどの分子イオン）やサイズの小さいマイクロクラスターイオンも含めて、構造やサイズが制御されたクラスターイオンの生成と応用の研究を行っている。その中で、反応性クラスターイオンを用いたフッ化反応によるSi表面のエッチング過程や酸化反応による酸化物薄膜形成過程において、クラスターイオン特有の表面反応過程を明らかにしてきた。

### 1. 研究の背景

塊状原子集団であるクラスターは、我々の周囲の巨視的な世界と原子・分子が活動する微視的な世界を繋ぐ役割を果たしており、材料科学的に解明すべき重要な研究対象になっている。例えば、クラスターイオンと固体表面との相互作用はフェムト秒からサブピコ秒の瞬時の多体衝突過程である。したがって、クラスター自身の特異な物理・化学的特性を活用し、クラスターイオンビームの固体表面への入射量を制御することによって、化学反応の活性化や選択性を、従来の原子・分子と固体表面との反応では達成できない瞬時の反応速度で制御することができる。さらに、クラスター照射時の高密度照射効果によるクラスター自身の超高温・超高压状態の形成は、アニール効果や化学反応の活性化を促進させ、高効率の表面エッチング加工や高酸化反応による高品質薄膜形成が可能となる。

### 2. 研究の成果

Si基板表面にSF<sub>6</sub>クラスターイオンおよびSF<sub>6</sub>モノマーイオンをそれぞれ15kVで加速して照射し、Si表面におけるエッチング過程について調べた。加速されたイオンを基板表面に照射しないようにチョッピングする場合、加速電極と基板の間に設けた偏向電極に250 Vの負のパルス電圧を印加して、イオンビームを偏向した。図1は、クラスターおよびモノマーイオン照射によってスパッターされたSi<sup>+</sup>イオンの強度を示す。図に示すように、クラスターイオン照射では、スパッターされたSi原子は得られていない。また、図2は、クラスターイオンおよびモノマーイオン照射におけるSiF<sub>3</sub><sup>+</sup>イオン強度、すなわちイオン照射によってSi表面からスパッターされたSiF<sub>4</sub>粒子の強度を示す。SiF<sub>4</sub>粒子の散乱強度は、モノマーイオン照射では極めて弱いが、クラスターイオン照射では観測されている。したがって、SF<sub>6</sub>クラスターイオン照射では、クラスターイオンの高密度照射効果による超高温・超高压状態が形成され、崩壊したSF<sub>6</sub>クラスターのF原子とSi基板原子との化学反応が促進され、室温でもSi表面の化学エッチングが生じていることが分かる。

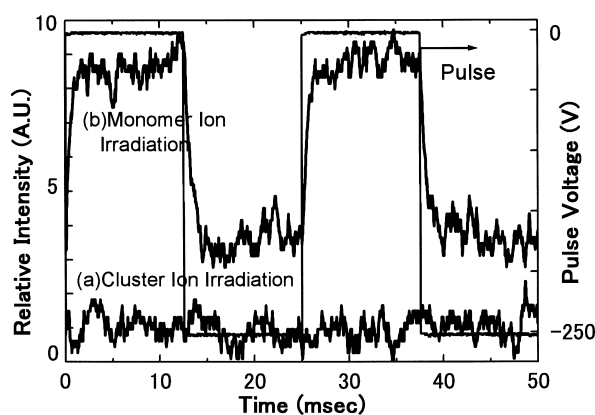


図1. (a) SF<sub>6</sub>クラスターイオンおよび (b) SF<sub>6</sub>モノマーイオン照射によるスパッターされたSi<sup>+</sup>の散乱強度

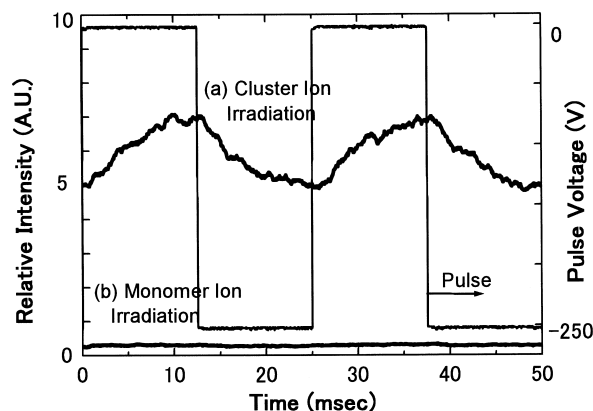


図2. (a) SF<sub>6</sub>クラスターイオンおよび (b) SF<sub>6</sub>モノマーイオン照射によるスパッターされたSiF<sub>3</sub><sup>+</sup>の散乱強度

## 通信システム工学講座 デジタル通信分野（吉田研究室） 「時間空間伝送による無線通信の周波数利用効率改善」

無線通信が社会において果たす役割が拡大している。これに伴って電波需要は極めて旺盛であり、より高い周波数帯の開拓が活発に進められている。しかし、送受信点間に見通しがない場合にも通信可能な使いやすい伝搬特性が得られる周波数帯は残念ながら限られており、周波数利用効率の改善は最も重要な課題である。近年、周波数利用効率を大きく改善できる方式として、従来なら混信となって通信不能であった同一周波数を同じ場所で同時に使う方式が脚光を浴びている。この方式は現在様々な呼称で呼ばれるが、我々はこれを時間空間伝送と呼んでいる。同一周波数の複数の信号全てが正確に復調できるなら、その信号数倍に周波数利用効率が高まることになる。この方式の核心は言うまでもなく複数信号の同時受信技術であり、当研究室において提案してきた複数信号同時受信機であるTCC(Trellis-coded Cochannel interference Canceller)の時間空間伝送への適用について研究を行っている。

図1は時間空間伝送の概念図である。この図では3つの信号を同時に3つのアンテナから送信し、3つのアンテナによって受信している。基本的にアンテナ間の相関は無い方が良いため、アンテナが十分に離れて設置されていると仮定する。つまり、この図ではアンテナ間を結ぶ9つの矢印があるが、この9つの伝搬路は独立にフェージングしているとする。同時送信する信号数を増せば周波数利用効率が向上するが、ここでは5信号を同時送信する場合を計算機シミュレーションによって検討する。周波数利用効率は通常の5倍である。5信号の混信であり通常なら全く受信できない条件であるが、5信号同時受信に拡張されたTCCでは受信が可能である。TCCは送信5信号に異なったトレリス符号化変調を用い、受信側における信号分離特性を高めることを技術的特徴とする。5信号の同時受信のため信号処理の演算量が大幅に増加するが、各種の演算量削減アルゴリズムにより実験室レベルでは実現可能な演算量となりつつある。図2に特性比較を示す。横軸はSN比、縦軸はビット誤り率である。図中TC-16PSKがTCCの特性、BLASTは米国のベル研で活発に研究されている受信方式である。図の $5 \times 3$ の表記は送信5アンテナ、受信3アンテナの意味であり、図2よりTCCを用いれば受信アンテナ数の削減または大幅な特性改善が可能であることがわかる。TCCは適応等化技術を拡張したものであるので、高速伝送の障害となる遅延波にも対応できる。たとえばこの技術を現在のセルラ方式携帯電話に導入する場合、基地局に5アンテナ、移動局に3アンテナ（現在は2アンテナを内蔵）と高度な信号処理を実装できれば、現在の5倍の周波数利用効率と20Mbpsの伝送速度を、高速移動かつ最大 $2 \mu\text{s}$ の遅延波存在下において実現できる可能性がある。

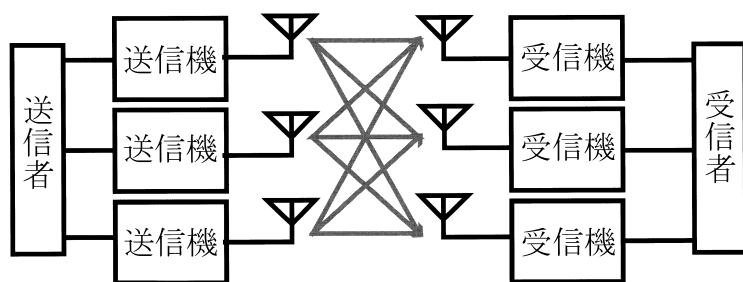


図1：時間空間伝送のシステムモデル

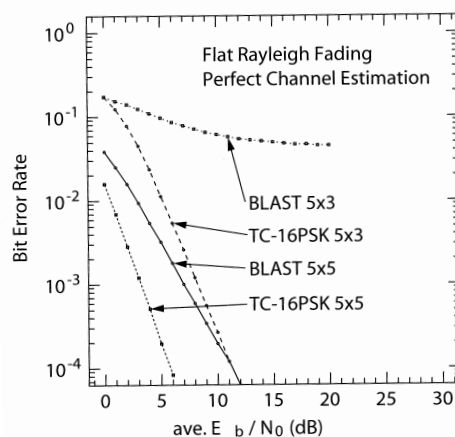


図2：ビット誤り率特性の一例

## 集積システム工学講座 大規模集積回路分野(小野寺研究室)

### 「オンデマンドライブラリを用いたシステムLSI設計手法」

本研究は、システムLSI設計における性能最適化と設計時間の短縮ならびに設計再利用の促進を図ることを目的として、設計回路や要求仕様に応じて最適なセルライブラリを生成し（オンデマンドライブラリ生成）、更に物理設計段階で低消費電力化/高速化を図る（詳細設計）技術を開発しようとするものです。現在、システムLSIに代表されるカスタムICでは、セルと呼ばれる基本論理ゲートを組み合わせて回路設計を行うセルベース設計が広く用いられています。一方、高性能なプロセッサなどは人手でトランジスタをレイアウトしていくフルカスタム設計手法が用いられています。フルカスタム設計では高性能な回路の設計が可能となりますが、設計の自動化が難しく設計に多大な労力を必要とします。本研究では、設計自動化に適したセルベース設計の枠組みを最大限に利用しつつ、フルカスタム設計に近い品質をセルベース設計の労力で実現することを目標としています。本研究の概要を図1に示します。

通常、セルベース設計では半導体製造側があらかじめ用意したセルライブラリを用いて設計します。ここで、セルライブラリの特性は回路特性に直接影響をおよぼします。システムLSIでは、設計対象の回路規模や要求特性は多岐にわたるため、セルライブラリへの要求も回路ごとに異なると考えられます。そこで、セルライブラリ設計も設計工程の一部ととらえ、設計対象毎に最適なセルライブラリを生成して用いることにより、冗長部分を含まない回路を設計しようというのがオンデマンドライブラリの考え方です。また、微細なLSI製造プロセスでは、レイアウト（配線）が動作特性に強い影響を与えます。そこで、設計の各段階において、配線の負荷や経路の不確かさを考慮しつつ、セル選択やバッファ挿入、更にはセル内トランジスタ寸法の調節により、速度、消費電力、ノイズ、面積の全てを最適化する技術（詳細設計技術）を検討しています。

提案手法の有効性を検証するため、実際のチップ設計にも適用しています。図2は、動画圧縮伸長用ベクトルプロセッサのチップ写真です。比較のため、通常ライブラリで作ったコアと、オンデマンドライブラリで作ったコアを集積しています。オンデマンドライブラリで作ったコアの正常動作をLSIテストを用いて確認しました。また、通常ライブラリのコアよりも低消費電力で小面積な回路が設計できていることで、提案設計手法の有効性を明らかにしました。

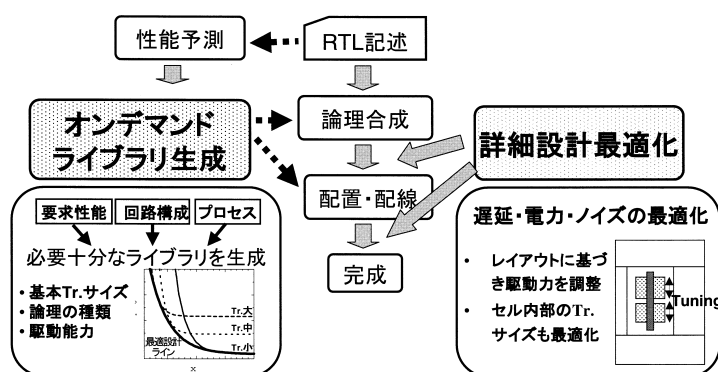


図1：LSI設計工程における本研究の位置づけ

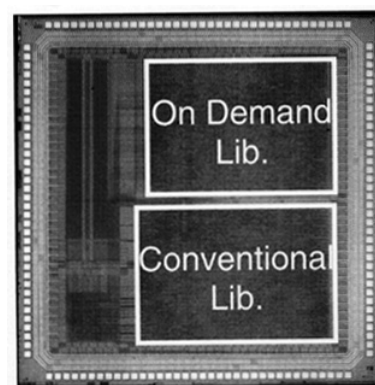


図2：動画圧縮/伸長ベクトルプロセッサ

## システム情報論講座 医用工学分野（松田研究室） 「ヒト胎児MR画像からの三次元臓器抽出」

### 1. 研究の背景

現在当研究室では、医学研究科附属先天異常標本解析センターが所蔵する大量のヒト胎児標本をMRI（核磁気共鳴画像）撮影装置により三次元画像化し、これを用いて標本の形状解析を行う手法について検討を進めている。同センターの標本は世界にも類を見ない貴重なコレクションであり、これらを有効に利用することは、人体発生の機序を解明する上で非常に大きな貢献を果たすものと思われる。大量の標本を十分に活用するためには、三次元画像の可視化に基づく形状の把握を、効率的に行うことが不可欠である。この際、胎児の臓器形状を三次元的に観察するためには、画像中から臓器領域を抽出する必要がある。

領域抽出手法として広く用いられるリージョングrowing法は、抽出対象領域の内部に予め設定された種点から周辺に向かって、予め定めた条件を満たす領域を拡張して行くことで所望の領域を抽出する手法である。一般にリージョングrowing法は、対象臓器の画素値範囲と、隣接画素値間の差分の最大値をパラメータとして用いる。ここで、後者は領域内部で生じる画素値変化の上限を指定するものであり、領域外部との境界で高い値を取ることを想定している。しかしこの値は直感的な設定が困難であり、通常試行錯誤的に値を変更して領域抽出を繰り返すことで最適値を求めるので、作業者の負担が大きい。そこで、この点を解決する領域手法の開発を研究の目的とする。

### 2. 提案手法と処理結果

本研究では対象領域と対立する外部領域中にそれぞれ設定した2点間の経路探索を行い、隣接画素値間差分の最大値のパラメータを自動抽出するリージョングrowing法を提案した。これは2点間の適当な経路について、経路に沿った画素値間差分の最大値を求め、この値が最も小さい経路に関して、この最大値を求めるパラメータ値とするものである。図1に示す模式図において、 $d(S,v,P)$ が求める値である。これによりこの2点は必ず2つの領域に分割されることが保証される。処理結果を図2に示す。提案手法は数値パラメータの設定を画像中の制御点指定に置き換えたもので、より直感的な操作が実現された。

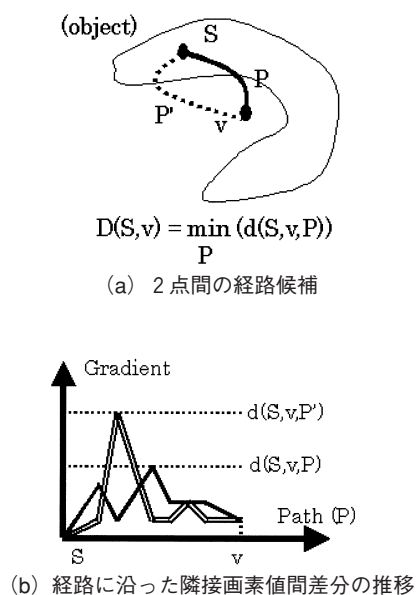


図1 2点間の経路に沿った隣接画素値間差分の推移

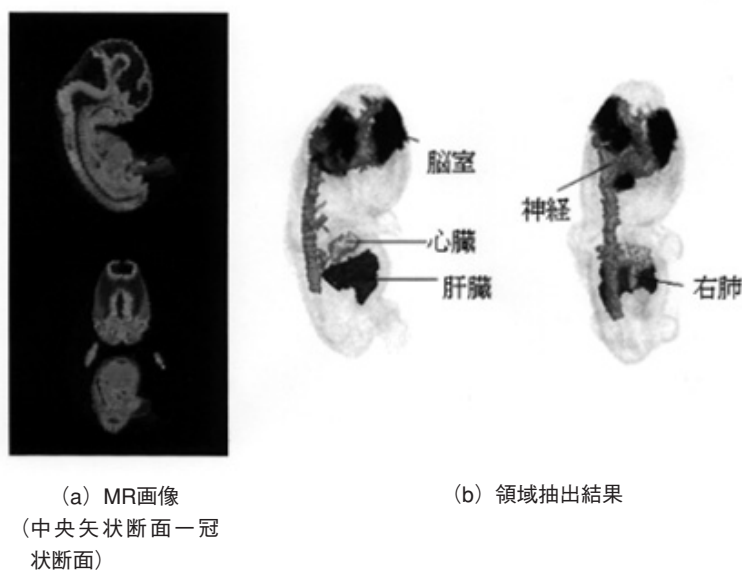


図2 処理結果



## エネルギー社会環境学講座 エネルギー情報学分野（吉川榮和研究室）

## 「保修訓練用インタラクティブ仮想空間構築支援システム」

バーチャルリアリティ技術を用いて仮想空間内に機器保修の訓練環境を構築することで、実空間における実物機器を用いた訓練に比べて、安全かつ容易に繰り返し訓練を実施できる環境が得られる。現時点では、計算機技術の飛躍的な発展と、これまでのバーチャルリアリティに関する様々な研究の成果により、実空間と同様の作業が可能な訓練環境を構築することが可能になった。しかし、一般にバーチャルリアリティ技術を用いて機器保修の訓練環境を構築する場合は多大な労力、すなわち多大な人件費が必要であり、単位訓練環境あたりの構築コストが非常に高いため、コスト削減が要求されている保修訓練の現場では受け入れられていないのが現状である。また、保修訓練の現場では、訓練を実施するインストラクター自身が訓練環境の構築・修正等を行いたいという要望があり、計算機やコンピュータグラフィックスの専門家でなくても、訓練環境の構築・修正をできるようにするための技術開発が必要である。

当研究室では、数年前から実空間と同様の作業を行うことができる仮想空間を、少ない労力で容易に構築できるようにするための様々な技術を開発してきた。例えば、仮想空間のシミュレーションを行うためには、仮想物体間の物理的拘束関係や因果関係を設定・管理する必要があるが、これらの情報をペトリネットを用いて効率的にモデル化する手法の開発や、プログラミングを全く行うことなく機器保修の訓練環境を構築できる「インタラクティブ仮想空間構築支援システム」の開発等を行ってきた。

図1は、インタラクティブ仮想空間構築支援システムを用いて構築した訓練環境の例で、訓練生は仮想空間内に配置された逆止弁を、スパナ等を用いて分解・組立する作業を体験できる。

インタラクティブ仮想空間構築支援システムは、機器保修の訓練分野だけでなく、他の様々な分野にも応用可能である。例えば図2は、食器棚の使い勝手を体験できる環境であるが、このような環境を用いることで、食器棚の扉がどのように開くか、食器棚に食器をどれだけ収納することができるか等を確認でき、今後も急速に発展するであろうと予想されるインターネットショッピングの仮想ディスプレイ環境としての応用も考えられる。

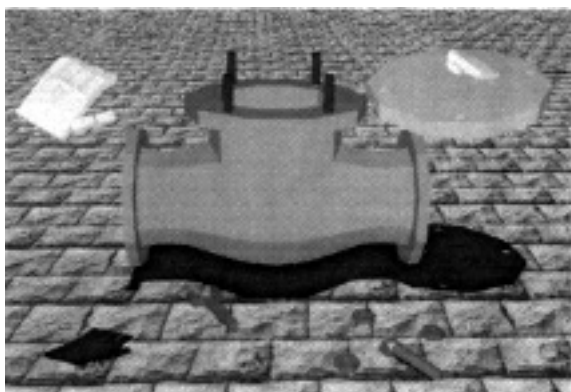


図1：逆止弁の分解・組立環境

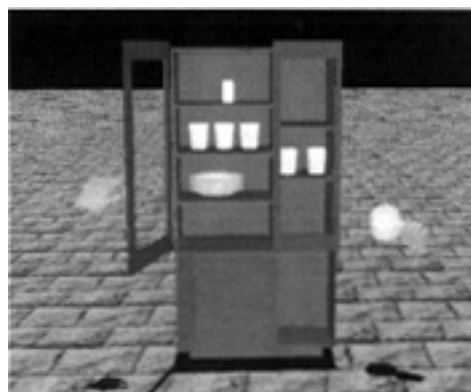


図2：食器棚の仮想体験環境

## 応用熱科学講座 プロセスエネルギー学分野（塩津研究室）

### 「超電導エネルギー貯蔵装置を用いた負荷電力系統の状態把握に関する研究」

#### 研究背景

近年の電力事業の規制緩和にともなう分散電源の増加などにより電力系統はますます大規模化、複雑化しているため、系統の安定度の低下が懸念されており、系統を安全に運用するためには系統の状態をオンラインで把握することが望まれる。そこで我々が提案しているのが超電導エネルギー貯蔵装置（SMES）を用いた系統の状態把握である。

#### 超電導エネルギー貯蔵装置（SMES）

SMESは超電導コイルに直流電流を流すことにより電力を磁気エネルギーの形で蓄える装置であり、超電導現象を利用しているために損失が少なく、交直変換装置の働きにより高速な電力制御が可能である。電力貯蔵の面では夜間電力を蓄え、電力需要の多い昼間に放出することで負荷平準化を行ない、系統の安定化の面では電圧安定化や、負荷変動補償などの働きにより系統の安定度を向上させることができる。米国ではトレーラーで移動できるような1MJクラスのSMESが実用化されており、雷などによる瞬停の際の非常用電源として、または電圧の補償などに用いられている。

#### SMESによる系統の状態把握

本研究では図1に示すように、電力系統に設置されたSMESから系統に対して微小な電力信号を与え、これに対する系統の電力動揺を解析することによって電力系統の状態把握を行なうことを提案し実験による検証を行なっている。SMESを用いることによりリアルタイムな系統状態の把握が可能であるので従来のオフラインでの固有値計算による把握手法に比べるとダイナミックに変化する系統状態をより忠実に捉えることが可能である。最近の試みではSMESから系統に与える電力信号をおよそ20秒間で0Hzから3Hzまで変化するチャープ状の電力信号とし、これに対する系統の応答から伝達関数を求めることにより系統の固有値を求めている。固有値の実部は系統の制動力、虚部が系統の同期化力に関する値であり、これらの値を把握することで系統状態を知ることができる。この手法によると系統状態が変化したときの系統の安定性がどう推移したかを把握することができ系統運用上非常に有用である。特に負荷側に分散電源を含んだ系統では逆潮流の発生する可能性があるため、この逆潮流の影響によって系統の安定性がどのように推移するかを図2の系統において測定した結果が図3である。このs平面上には固有値がプロットされており、右下から左上に向かうほど安定性は向上する。この結果から逆潮流状態では系統の安定度が低下していることが確認できる。

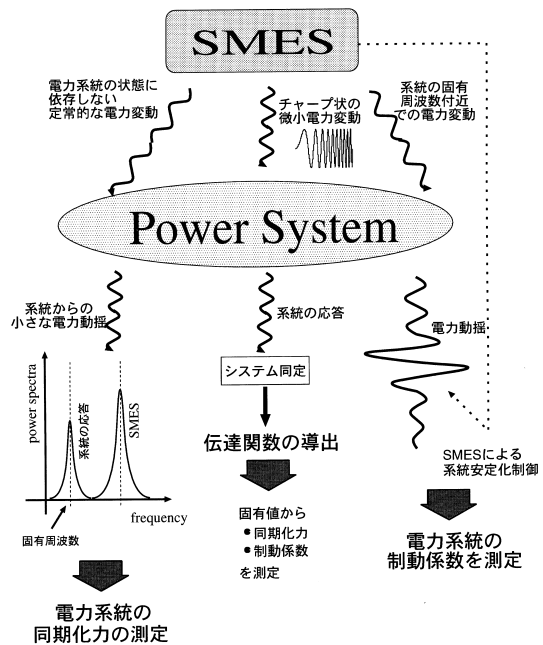


図1：実験概念図

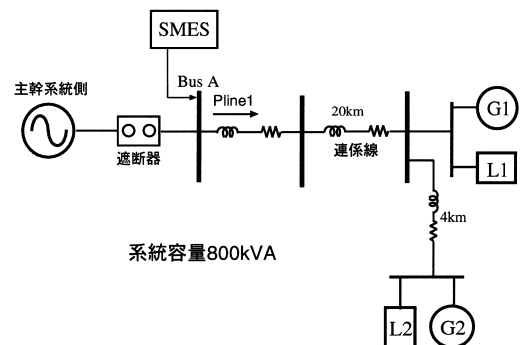


図2：実験系統図

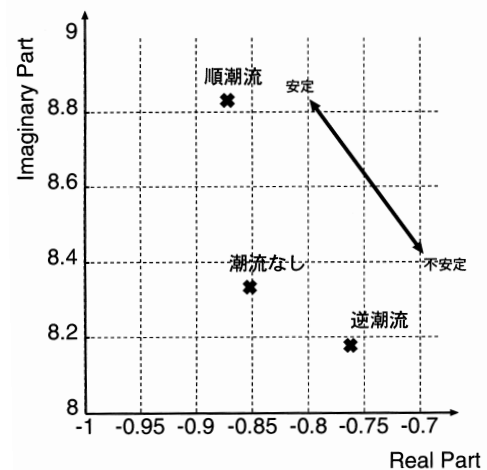


図3：系統の状態推移

## エネルギー生成研究部門 原子エネルギー研究分野 「慣性静電閉じ込め方式プラズマのシミュレーション」

静電慣性閉じ込め核融合（Inertial Electrostatic Confinement Fusion; IECF）は図1に示すような球形の真空容器にイオンビームを静電場を用いて半径方向に閉じ込め、中心付近でビーム・ビーム及びビーム・バックグランドガスの衝突による核融合反応を起こさせるものです。IECFは、(1)形状が単純である、(2)非マクスウェル分布のビーム衝突核融合であるので、高いイオンエネルギーを必要とするD-<sup>3</sup>Heなどのアドバンスド燃料を用いることが可能である、などの特徴を持っています。

これまでの実験研究では、1967年に米国のHirschがD-T（重水素と3重水素ガス）を用いた実験で $10^9$ n/sの中性子の発生を観測したのが最大でしたが、再現実験に成功していませんでした。しかし、ここ数年の日米で精力的な研究で、今年8月時点では、D-D実験での中性子発生量が $10^8$ n/s台に達し、中性子源としての応用へ向けての展望が見えてきました。実用化には、後数桁の核融合反応率の向上が必要と考えられ、現象の解明と新たな実験の方向性を探していくことが求められています。

本研究室では、IECF動作原理の解明と核融合反応率の向上を目指して、シミュレーションによる研究と小型の円筒形IECF装置を用いた比較検討実験を進めています。

これまでのIECFシミュレーションでは、粒子シミュレーションコードによりイオンと電子を追跡することにより、イオン電流と陰極内での電場形成や核融合反応率の関係を調べましたが、グロー放電を用いている現在の実験では、ガス圧力が約1Paと高く、ガスとの衝突過程が大きく影響していると考えられます。そこで、カリフォルニア大学バークレー校で開発された、プロセスプラズマのシミュレーションコードを参考に、ガスとイオン／電子の衝突過程（電離、荷電交換、散乱など）をモンテカルロ手法により扱うIECF 1次元粒子シミュレーションコードの開発を行っています。

IECFのシミュレーションのためには、(1)透過率の高いメッシュ状電極のモデリング、(2)プロセスプラズマでは～1kVであった印加電圧が数10kVと高いこと、また球形状の中心（特異点）付近を扱うための計算精度の向上、(3)水素イオンの解離に反応など分子ガスを扱うための改良、高エネルギー中性粒子の影響評価などが課題となっています。これまでの計算では、ヘリウムを用いた放電のシミュレーションにより、真空容器の半径を増大していくと、グロー放電の陽極グロー領域が生成されていく模様や、大電流放電で陰極中心部の電位が振動する模様（図2）が得られています。現在は、課題3の重水素放電を扱うための種々の原子過程の組み込みとその影響評価、核融合反応率の計算を行うとともに、上記の陰極中心部での電位振動によるイオン・電子のエネルギー分布の広がりの影響を調べている。今後は、コードの2次元への拡張を進めるとともに、実験によるシミュレーションの検証を目指して、ガス圧力や電極形状の影響評価など実験において測定可能な項目を探していく計画です。

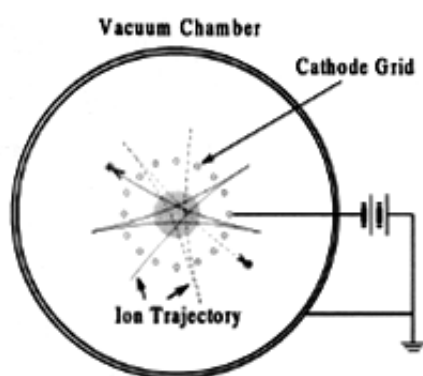


図1 IECFの概念

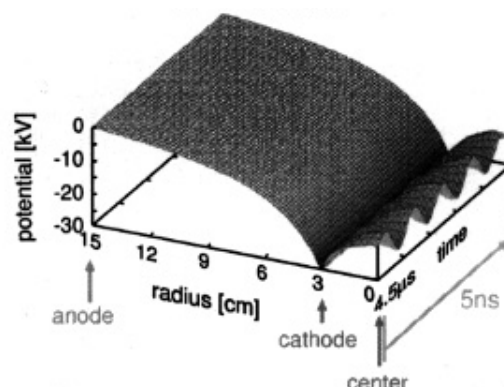


図2 電位分布の時間変化



## エネルギー機能変換研究部門 複合系プラズマ研究分野 (佐野研究室) 「ヘリオトロンJ」におけるエラー磁場の影響による磁気島の生成に関する研究

### 1. 研究目的

ヘリカル系磁場閉じ込め装置では、外部導体であるコイルに電流を流し、それらによってつくられる磁力線をトロイダル方向に周回させて真空磁気面を形成することによってプラズマを閉じ込める。しかし、コイルを作成したり、設置したりする際には必ず、歪みやずれが生じてしまう。またコイルには給電部をつけなくてはならない。このような歪みやずれ、そして給電部はエラー磁場を引き起こし、有理面を含むような真空磁気面が形成される過程では、プラズマ閉じ込めに影響を与えるような磁気島の生成を促してしまうことがある。本研究の目的は、立体磁気軸低シアーステラレータ配位のヘリオトロンJ [1] を対象にして、エラー磁場による磁気島生成の描像を理論的に数値解析的手法を用いて明らかにすることである。具体的には4つの要因（ヘリカルコイルの給電部、ヘリカルコイルの大半径・小半径の歪み、ヘリカルコイルの設置誤差）によるエラー磁場が、標準配位付近の低次のモードの磁気島を引き起こす可能性のある有理面にどのような影響があるか、を数値解析で調べた。

### 2. 方法

ヘリオトロンJのそれぞれのコイルに流れる電流をビオサバールの法則を使い、磁場を求め、磁力線の方程式で磁力線を追跡し、磁気面を得る。給電部を考慮するときには、磁場を求めた段階で、サブルーチンで求めた給電部が作り出す磁場を加える。回転変換を変えるときには、トロイダルコイルの電流値を変えて計算する。本研究では、ヘリカルコイルを3本並列8ターンのフィラメントとして計算し、各8個のトロイダルコイルA、B、6個のバーチカルコイルはそれぞれをコイル断面の重心をとって1本1本のフィラメントとして計算した。また8個のヘリカルコイルの給電部は1本の三角形のループ電流で近似し、三角形の高さ $h$ 、底辺 $w$ は実際の寸法に合わせて $h=16$  [cm]、 $w=9$  [cm] とした。

### 3. 結果および考察

4つの要因について、計算の結果、もっとも影響が大きかったのはヘリカルコイルの給電部によるエラー磁場で、 $\iota=0.5$ 付近では $n/m=1/2$ の磁気島を生成することが分かった（図1）。またヘリカルコイルの設置誤差によるエラー磁場は、その設置誤差が1 [mm] と非常に小さいにも関わらず、 $\iota=0.5$ 付近で $n/m=1/2$ に近い $n/m=2/4$ の比較的大きな磁気島を引き起こすことが分かった（図2）。このことは、実際の設置誤差において、問題となる磁気島が発生する可能性があることを示すものである。しかしヘリカルコイルの大半径・小半径の歪みは、実際の最大誤差の1 [mm] 程度であれば、殆ど影響がないことも分かった。また有理面でみると、 $\iota=0.5$ の場合が調べた中で最もエラー磁場に影響を受けやすかった。以上のことから、調べたエラー磁場の中で、閉じ込めに問題となるのは給電部によるエラー磁場と設置誤差によるエラー磁場であり、 $n=1$ の摂動（perturbation）を含んでいるということがいえる。

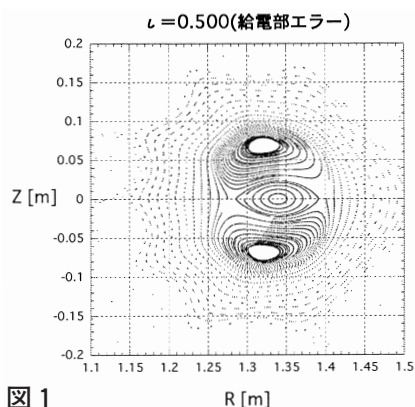


図1

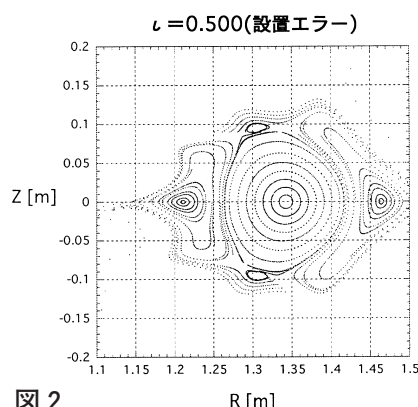


図2

参考文献 [1] 佐野史道、大引特弘、花谷清、水内亨、岡田浩之、長崎百伸、近藤克巳、若谷誠宏、中村祐司、中須賀正彦、別生栄、横山雅之、“ヘリカル軸ヘリオトロン装置（ヘリオトロンJ）実験計画” J. Plasma and Fusion Research, 75 (1999) 222-229.



## 地球電波科学研究部門 地球大気計測分野（津田研究室） 「Rubyによる地球・惑星流体データの解析・可視化環境の開発」

### 1. 研究の背景

当研究室では、地球大気の観測手法の開発並びに大気の観測的研究と数値モデリングを行っている。地球大気の観測は各国が協力して行っており、近年ではネットワークを通じたデータの配信・共有も進んでいる。それに応じて、さらに研究の高度化とも相俟って、地球大気の研究が扱うデータは、種類・量ともに増大している。例えば、フィールドに出て観測を行なう者も、自らの観測データに加えて、人工衛星データや、「客観解析データ」と呼ばれる世界の予報用観測を統合した格子点データ等と比較して、大気現象を総合的に把握することが求められている。このような、広く言えば地球・惑星流体科学において扱われるデータは主に、離散的にサンプルされた、あるいは格子点上に離散化された物理量である。そのデータ形式には、広く用いられているものに限っても複数あり、研究の現場において、様々なデータへの対応に対する負担が増大している。

### 2. 研究目的

本研究は、上記の問題に対処し、さらに今後必要になる、ネットワーク上に分散したデータの効率良い扱いを念頭に置いて、地球・惑星流体科学におけるデータ解析のためのインフラを構築することを目的としている。研究上のデータ解析においては、自由に新しい手法を開発、適用、さらに蓄積する必要があるため、GUIを使った操作のみでは事足らず、プログラミングを通してデータを扱うことが必須となる。そのため、素早い開発に適したインタープリター型で、対話的にも利用できる言語が求められ、近年ではMatlabやIDLが活用されている。しかしながら、非オブジェクト指向型のこれらの言語では、多様性への対応が難しい。我々は、これらに代わって、オブジェクト指向スクリプト言語Rubyをデータ解析に用い、上述の問題を解決するための開発を行なっている。

### 3. 研究内容

本研究は、基礎となるライブラリーの組み込みと、それらを用いた「離散化された物理量」のクラスのライブラリーの開発という、二つの段階に分けることができる。開発は昨年度後半に開始した。  
[基礎ライブラリー] RubyはCの関数を動的に呼べるようにすることが簡単であるため、様々なライブラリーを取りこむことで、短期間に幅広いサポートを行なう。現在までに組み込みを行なった基礎ライブラリーは、多機能グラフィックライブラリーDCL、後述するNetCDFのライブラリー、並びにFFT等若干の数学ライブラリーである。さらに、近々、GSL数学ライブラリー、HDF入出力ライブラリーの取りこみを予定している。なお、以上共通で、高速性に優れる多次元数値配列クラスを用いている。  
[離散物理量クラスライブラリー] データの計算機上での実体を隠蔽しつつ、当該分野における物理量のデータを出来るだけ広くカバーするクラスのライブラリーを構築している。これにより、一度オープンすれば、データ形式に依存せず同じ命令で操作できるようになるため、データ解析プログラムの汎用化が容易となる。物理量の構造化には、NetCDF型のモデルを採用した。NetCDFとは、数値データと付加的な情報がツリー状に整理され、座標変数、単位等を持ち、データ欠損等のあり得る「自己記述的」データ形式である。本クラスのユーザーは「第N次元に関する微分」や「座標値がこれこれの範囲の切り出し（と可視化）」といった、抽象的な命令によりデータを操作することになる。このクラスをデータ解析の単位とすることで、唯一つのデータ形式しか用いないケースについても、現在用いられている多くの環境より高い効率でデータ解析プログラムが開発できる。なお、データ形式としては、非自己記述的データセットもテンプレートにより柔軟にサポート出来るようにする。将来的には、Rubyのネットワーク機能を生かし、ネットワーク上に分散したデータも、オープン時以外に特別意識せずに扱えるようにする計画である。

## 宙空電波科学研究部門 宇宙電波工学分野（松本研究室） 「北極上空でのロケットによるプラズマ波動観測 ―結果報告―」

昨年のCUEにおいて、2000年11月に北極圏での打ち上げを予定していた「SS-520-2ロケット実験」について「北極上空でのロケットによるプラズマ波動観測」と題して紹介しました。その記事は打ち上げ前のもので、「恐らくこの記事が印刷されて配布されている頃には、私達のロケットは無事に打ち上げられ、データを地上に送り届けた後、北極の海底で役割を終えて眠っていることでしょう。」と結んで終わっています。本稿では、その後の経過を紹介したいと思います。このロケット実験の目的は、地球磁気圏の中で、「カスプ」という北極、南極の上空にある領域を直接観測することにあります。私達は、文部科学省宇宙科学研究所と共同でロケット実験SS-520-2を計画し、2000年11月の打ち上げに向けてプラズマ波動の観測機器の開発を行いました。開発したハードウェアは、次世代の宇宙探査への技術開発もターゲットとしてデジタル技術を大きく導入した新しいデザインのものでした。しかし、かなり新しい技術項目を導入したため、打ち上げ前の地上試験ではトラブル続き。今でこそいえますが、観測機に書き込むオンボードのソフトウェアが完成したのは、「最終動作チェック日の朝6時」、というまったくもって綱渡り状態でした。そんなこんなで打ち上げに臨みました。研究室からは、観測機の開発を直接担当してくれた大学院の学生さん2名が参加してくれました。打ち上げ場所は北緯79度、東経12度のノルウェー領スバルバード諸島、まさに、北極圏。打ち上げ予定日の11月25日を前に1週間前から現地で作業にはいります。当然、冬ですので太陽は昇りません。一日中真っ暗の世界です。しかし、外気は意外と暖かく、氷点下10度程度でおさまっていたようです。11月25日の打ち上げに向けて、準備作業は順調に行われ大きなトラブルもなく、当日を迎えました。しかし、上で書きましたように、「カスプ」がロケットの打ち上げる方向と高度になくはいけません。カスプは、地球の磁気圏活動が活発になると、その緯度が下がってくるため、そこを狙って打ち上げなくてはなりません。また、地球は自転していますので、一日のうち打ち上げができるのは、午前中からの数時間に限られます。つまり、打ち上げの準備ができていても、「宇宙のお天気」が好都合でないと打てないのです。もちろん、地上のお天気にも左右されます。打ち上げタイミングは慎重に判断され、その結果、10日間も打ち上げ態勢のまま待機した結果となりました。しかし、この「待ち」の試練がよかったのでしょうか、後から振り返れば唯一のチャンスであった12月4日午後6時16分（日本時間）に無事に打ち上げられました（翌日から暴風雪となり打ち上げは不可能でした）。ロケットの飛翔、私たちの観測機を含めた全観測機の機能もすべて正常、高度1,100kmに到達した後は、自由落下で北極海にポチャリと落ちた（はず）で、打ち上げ後20分ほどでロケットとの通信が予定通り終了しました。色々、心配もありましたが、私たちの観測機は完璧に動作しました。端から端まで10mある長いアンテナの自動伸展も正常でした。観測データは非常に品質の高いものでした。現在その解析が進められていますが、これまでやられたことのなかった「静電波」の伝播方向のインターフェロメトリ解析など新しい試みから生まれた結果も得られており、ハードウェアについてはすでに電子通信情報学会の論文として掲載されました。現在、物理現象についての論文をとりまとめており、ロケット実験の成果をまとめているところです。衛星開発と違って、ロケット実験の装置開発は、短期決戦です。このSS-520-2のあった西暦2000年は、私たちにとって大変長く、短い1年でした。手塩にかけた私たちの観測機も今は、すべての役割を無事に終えて北極海の海底で、お魚のいいお宿となって、第二の人生を送っていることと思います。このロケット実験のホームページを学生さんが作ってくれています。写真などありますので、興味のある方は、<http://www.kurasc.kyoto-u.ac.jp/plasma-group/PWA/>までどうぞ。

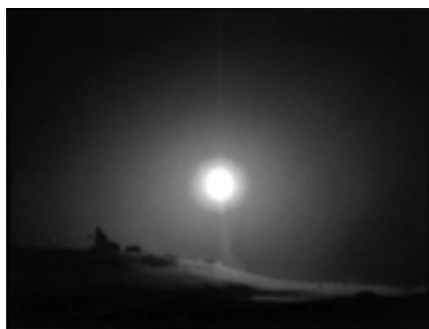


図1：閃光とともに飛翔するSS-520-2ロケット（宇宙科学研究所）



図2：発射台上のSS-520-2ロケット（宇宙科学研究所）

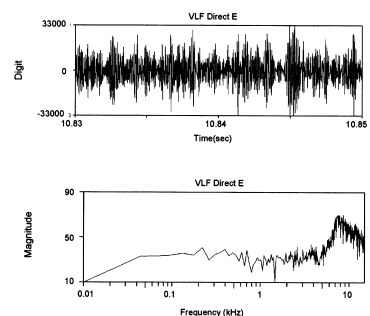


図3：プラズマ波動観測機で観測された電磁パケット波形（上）とスペクトル（下）

## 宇宙電波科学研究部門 電波科学シミュレーション分野（大村研究室） 「宇宙プラズマ環境におけるダイポールアンテナ特性に関する研究」

本研究室では、宇宙プラズマ環境での様々な電波現象に関して計算機シミュレーション解析を行っています。宇宙空間はイオンと電子からなる希薄なプラズマで満たされており、その中で生起する電磁現象はマックスウェル方程式と膨大な数のプラズマ粒子の運動方程式を組み合わせることで解き進めることにより再現することができます。本稿では、その一例として宇宙プラズマ環境中でのダイポールアンテナ特性に関する計算機シミュレーションを紹介します。

真空中でのダイポールアンテナの特性（アンテナインピーダンスや放射特性）はよく知られています。最近では、FDTD（Finite Difference Time Domain）法によるアンテナ解析が行われています。しかし、プラズマの異方性や分散性および運動論の効果を考慮した状況でのアンテナ特性解析は容易ではありません。アンテナ周りのプラズマシースやアンテナ表面からの光電子放出によりアンテナ近傍のプラズマ環境は一様ではなく、このような状況を取り入れたアンテナ解析はこれまであまり行われていません。

このような複雑なプラズマ環境におけるアンテナ特性の定量理解は、学術的のみならず科学衛星による宇宙電波観測の更なる高精度化、宇宙環境における電波利用など工学的分野でも非常に重要です。図1にシミュレーションモデルを示します。プラズマ粒子で満たされた3次元格子点空間の中央にダイポールアンテナを設置し、その中央に広帯域のパルスを送電することによりプラズマ中でのアンテナ応答を解析します。図2にアンテナインピーダンス虚部の周波数特性を示します。図中、真空およびプラズマモデルにおけるシミュレーション結果、比較のためにBalmainによるプラズマ中のアンテナインピーダンス理論値をプロットしました。シミュレーション結果ではプラズマ周波数においてインピーダンスの大きな変化が見られます。それより高周波領域では真空とプラズマでは大きな違いが見られません。理論とシミュレーションを比較してみると、プラズマ周波数でのインピーダンス変化はほぼ一致しているが、高周波領域での値はシミュレーション結果と大きくずれており、理論が限られた周波数範囲でのみ有効であることがわかります。このように、計算機シミュレーションによりプラズマ中のアンテナ特性を定量的に解析できることが明らかになり、今後、地球磁場などの静磁場、アンテナからの光電子放出の効果を考慮した、より現実的なモデルを用いて計算機シミュレーションを進めていく予定です。またアンテナおよび電波と宇宙プラズマとの相互作用に関するシミュレーションは宇宙太陽発電（SPS）に関する理論的考察においても非常に重要であり、今後この分野にも本シミュレーションを応用していく予定です。

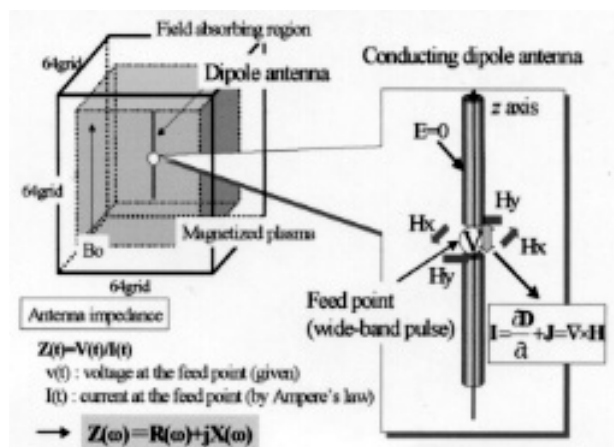


図1：計算機シミュレーションモデル。中央にダイポールアンテナが設置されている。

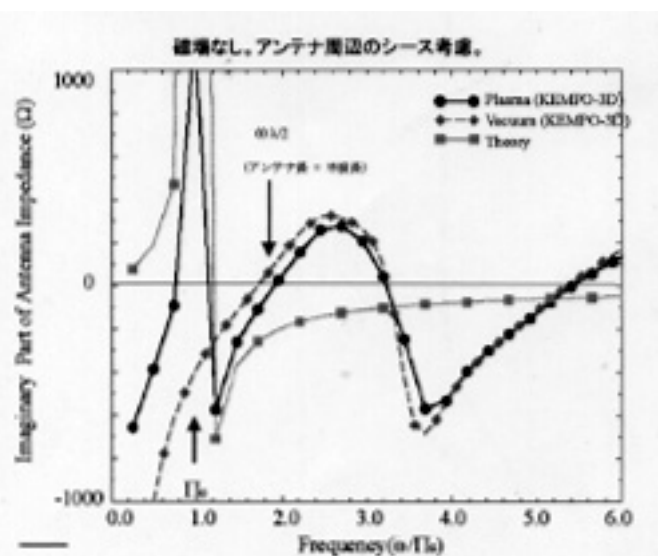


図2：真空、プラズマモデルを用いたアンテナインピーダンスの周波数特性。 $\Pi_0$ はプラズマ周波数。